

方舱射线防护中铅玻璃观察窗与墙体接缝处的连续屏蔽构造技术分析

朱伟龙

苏州江南航天机电工业有限公司 江苏 苏州 215101

【摘要】：在方舱射线防护体系中，铅玻璃观察窗与墙体接缝的屏蔽连续性，是保障整体防护效果、防止射线泄漏的关键所在，其构造设计的合理性直接决定方舱整体防护等级。本文以该部位连续屏蔽构造为研究对象，分析构造设计要点、材料适配特性与施工工艺要求，对比不同构造形式的屏蔽效能差异，确立铅玻璃与墙体基材的合理衔接准则，解决接缝易出现缝隙、松动等防护缺陷，提出兼顾密封效果与结构稳定的优化构造方案，实现接缝区域射线屏蔽的无缝衔接，可为方舱射线防护工程中观察窗接缝的设计、施工与质量控制提供技术参考，确保方舱防护系统满足相关安全规范要求。

【关键词】：方舱射线防护；铅玻璃观察窗；接缝屏蔽；连续屏蔽构造；射线泄漏控制

DOI:10.12417/2811-0722.26.06.053

引言

方舱是射线检测、医疗诊疗等场景的关键防护设施，其射线屏蔽性能直接关系到操作人员与周边环境的安全。铅玻璃观察窗作为方舱内唯一的可视化观测通道，与墙体接缝处的屏蔽连续性，通常是整体防护体系中的薄弱环节。接缝处一旦出现细微缝隙或构造缺陷，便可能引发射线泄漏，降低方舱整体防护效果，形成安全隐患。针对这一问题，本文以方舱射线防护中铅玻璃观察窗与墙体接缝的连续屏蔽构造为研究对象，结合实际防护需求，剖析构造设计与施工环节的关键技术要点，弥补现有接缝屏蔽技术在细节上的不足，为提升方舱整体防护水平提供技术依据，也为后续构造方案的分析与优化奠定研究基础。

1 方舱射线防护及铅玻璃观察窗接缝屏蔽的背景与现状

方舱射线防护作为射线相关作业场景里保障人员与环境安全的关键环节，广泛应用于医疗诊疗、工业射线检测、核应急处置等多个领域，核心目标在于实现射线的全方位无死角屏蔽，彻底消除射线泄漏带来的安全隐患。铅玻璃凭借优异的射线屏蔽效能与透光特性，成为方舱观察窗的核心选材，能够满足作业期间可视化监测的实际需求，然而铅玻璃与方舱墙体的接缝位置，受材料特性差异、构造衔接不合理等因素影响，成为整个防护体系的薄弱节点。当前阶段，方舱射线防护整体技术已发展至成熟水平，墙体、舱体等主体部位的屏蔽工艺已形成完善体系，但针对铅玻璃观察窗与墙体接缝处的连续屏蔽研究仍存在细节层面的不足，现有构造形式大多聚焦于基础衔接功能，对接缝部位的密封性、结构稳定性及屏蔽连续性的考量不够周全，无法充分适配不同作业场景下的防护要求，相关构造技术的适配能力与运行可靠性仍有待进一步改进提升。

2 方舱铅玻璃观察窗与墙体接缝处连续屏蔽存在的问题及成因分析

方舱铅玻璃观察窗与墙体接缝的连续屏蔽质量，直接决定整体射线防护系统的可靠性与安全性，也是衡量方舱防护工程建设质量的重要指标。当前在实际工程应用中，该部位普遍存在屏蔽层断续、内部缝隙隐蔽、射线泄漏风险偏高、结构稳定性不足等问题，不仅大幅降低观察窗区域的防护能力，也直接拉低方舱整体辐射安全水平，给操作人员与周边环境带来潜在威胁。这些问题的形成并非偶然，而是材料自身特性、构造设计不合理、施工工艺管控不严等多重因素交织作用的结果。从材料层面来看，铅玻璃与方舱墙体防护基材物理性能差异显著，铅玻璃质地脆硬、韧性与抗形变能力较弱，且热膨胀系数与墙体常用高密度防护板材相差较大，在环境温度反复波动、舱体运输及作业震动、长期使用材料老化等因素共同影响下，两种材料伸缩与形变步调不一致，极易在衔接界面产生肉眼难以察觉的微小缝隙，破坏屏蔽层的连续完整性^[1]。在构造设计方面，部分方案对接缝区域的屏蔽功能与结构受力缺乏统筹考虑，未设置适配的过渡衔接结构与限位加固措施，仅采用简单拼接与表层封堵，既不能形成连续可靠的屏蔽通路，也无法保障长期使用中的结构稳固，易出现松动、开裂、脱落等问题。施工环节同样存在明显短板，填充材料选型与基材不匹配、铺设压实不密实、界面贴合不紧密，易形成内部空隙；加之铅玻璃安装定位精度不足、后期养护工序缺失，进一步加剧构造缺陷。多重不利因素相互叠加，最终导致接缝处屏蔽效能持续衰减，射线泄漏隐患难以根除，无法满足医疗诊疗、工业无损检测等场景对方舱射线防护的严格标准。

3 方舱铅玻璃观察窗与墙体接缝处连续屏蔽构造优化及实施方法

3.1 接缝处屏蔽不连续及缝隙隐患

3.1.1 接缝处易产生微小缝隙

铅玻璃与方舱墙体防护基材在物理性能上存在明显差异,铅玻璃质地脆硬、韧性较低,抗变形与抗振动能力较弱,而方舱墙体多采用高密度、高模量的防护板材,二者热膨胀系数差异显著,温度变化时的伸缩特性难以匹配。在方舱实际使用过程中,环境温度周期性波动、舱体作业与运输过程中的持续轻微震动,以及长期服役引发的材料老化等因素,会不断加剧两种材料形变不同步的问题,进而在观察窗与墙体的衔接界面逐步形成细微缝隙。这类缝隙宽度极小、隐蔽性强,常规检查难以发现,但会直接破坏屏蔽层的整体连续性,成为射线穿透外泄的主要通道,不仅显著削弱接缝位置的防护能力,也会降低方舱整体射线屏蔽安全性,给现场作业人员与周边环境带来潜在辐射风险。

3.1.2 缝隙易进一步扩大且难以察觉

接缝区域初期形成的微小缝隙若未能得到及时处理,在方舱长期运行过程中会持续受到外界因素作用而不断扩展。舱体运行时产生的震动、环境温度周期性变化引发的热胀冷缩,以及材料自身的老化形变,都会使原有缝隙逐步变宽变长,进一步破坏屏蔽结构的完整性。加之观察窗与墙体的衔接位置多处于结构转角或内侧隐蔽区域,常规目视检查与简易检测手段很难精准发现缝隙的存在与发展态势,使得射线泄漏隐患长期处于隐蔽状态。随着缝隙持续扩大,接缝处屏蔽失效风险不断升高,方舱整体防护效能被持续削弱,无法满足射线作业场景下对防护结构稳定性与屏蔽可靠性的严格要求。

3.2 构造设计不合理的相关问题

3.2.1 衔接结构设计缺失

部分方舱屏蔽构造在设计阶段未能充分结合铅玻璃与防护墙体的材料特性及衔接特征,缺少专门针对接缝区域的过渡衔接构件,仅采用铅玻璃与墙体直接拼接的简易形式,无法实现两种材料间的可靠贴合。此类设计既未考虑铅玻璃脆性大、易形变错位的特点,也未在接缝位置布置增强屏蔽的辅助结构,使得衔接部位仅依靠简单接触形成防护,缺少连续、均匀的屏蔽过渡层^[2]。在实际使用中,这种简单对接方式难以抵消材料形变带来的间隙变化,接缝位置极易出现局部悬空或贴合不严的问题,屏蔽层无法形成完整闭环,射线可沿衔接薄弱位置穿透外泄,直接导致方舱观察窗区域整体屏蔽效能下降,难以达到射线防护的设计标准。

3.2.2 设计未兼顾稳定性与屏蔽性

部分设计方案在开展接缝构造设计时,片面追求安装工序的简便高效,对衔接位置的结构耐久与稳固性重视不足,未设

置相应的限位、加固与抗形变构造,致使铅玻璃与墙体的连接仅依赖简单填充或固定件约束。在舱体震动、温度变化等长期作用下,接缝部位极易出现松动、位移甚至局部脱落,直接破坏整体结构完整性。与此同时,设计环节未根据接缝工况合理匹配屏蔽材料与构造形式,未能将结构支撑与射线屏蔽功能进行一体化整合,结构强度与屏蔽效能难以协同发挥,既无法保证长期使用中的结构可靠,也不能维持稳定的屏蔽效果,最终造成接缝区域在安全性与防护性上均无法满足方舱射线防护的实际使用标准。

3.3 施工工艺不规范的影响

3.3.1 填充材料选择与铺设不当

施工阶段在接缝封堵材料的选用上存在明显不合理性,多数工程未采用与铅玻璃、防护墙体基材力学性能及屏蔽特性相匹配的专用填充材料,而是选用普通密封材料替代,难以实现材料间的兼容衔接与射线屏蔽功能。在填充施工过程中,又因操作粗放、工序把控不严,填料无法充分填满接缝内部空间,常出现填充不密实、内部空鼓、边缘贴合不紧密等问题,使得接缝内部形成肉眼难以发现的隐蔽空隙与贯通通道^[3]。这些薄弱区域无法形成连续有效的屏蔽层,射线可轻易穿透空隙向外泄漏,不仅让观察窗部位的屏蔽构造失去应有作用,也为方舱整体射线防护埋下长期安全隐患,直接影响防护系统的可靠性与使用安全性。

3.3.2 施工操作精度不足

在铅玻璃观察窗的现场施工中,安装定位普遍缺乏精细化管控,放线、找平、校核及固定等工序执行较为粗放,极易出现铅玻璃位置偏移、角度倾斜、与洞口不同心等偏差,使其与墙体预留安装位之间间隙不均,接缝宽窄差异明显且边缘衔接不顺。此类安装偏差属于结构性缺陷,后续仅依靠填充材料难以彻底修正,会直接造成局部间隙过大或材料受压变形,破坏屏蔽层的连续与均匀性。同时,填充施工中的压实、收光及养护工序也常不规范,填料无法与两侧界面紧密贴合,内部易残留孔隙,固化收缩后还会产生微裂缝,进一步加剧构造缺陷。多重问题叠加使得接缝处屏蔽结构不连续,形成隐蔽的射线穿透通道,显著降低观察窗区域的整体屏蔽可靠性。

4 接缝处连续屏蔽构造优化后的防护成效及验证

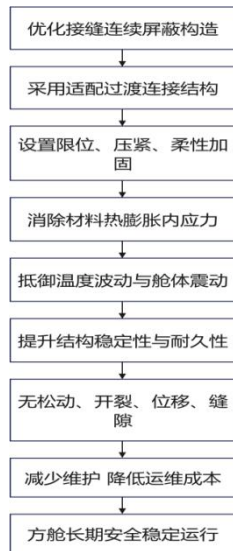
4.1 接缝处射线屏蔽效能的提升

经过优化完善的接缝连续屏蔽构造,从结构与材料两方面解决了传统设计中缝隙多发、屏蔽不连续等突出问题,实现铅玻璃与防护墙体之间的紧密无缝衔接,大幅提升接缝区域的射线屏蔽能力。通过增设适配性过渡结构、选用高密度专用屏蔽填料,可在接缝位置形成连续且均匀的屏蔽层,有效阻断射线穿透通道,避免因微小间隙造成的泄漏问题^[4]。优化后的构造可使观察窗接缝处的屏蔽指标与方舱主体墙体保持一致,能够

适应医疗诊断、工业射线检测等多种复杂作业环境，满足相关防护规范对屏蔽可靠性的要求。整体防护体系因此形成完整闭环，从源头消除缝隙带来的安全隐患，显著提升方舱在长期使用过程中的防护稳定性，为现场操作人员及周边环境提供更加可靠的安全保障。

4.2 接缝部位结构稳定性的强化

优化后的接缝连续屏蔽构造在提升屏蔽效果的同时，显著增强了衔接区域的结构稳定性与长期耐久性，从根本上解决了传统构造易松动、开裂、脱落及变形错位等问题。设计上采用与铅玻璃和墙体基材性能相匹配的过渡连接结构，配合限位、压紧与柔性加固措施，有效缓解两种材料因热膨胀系数差异带来的内应力，降低温度波动、舱体运行震动及长期服役老化对接缝部位的影响。该构造让铅玻璃观察窗与墙体形成协同受力的整体，在外力与形变作用下不易产生位移、分离或次生缝隙，长期使用仍能保持结构完整与界面密贴。结构可靠性的提升大幅减少了日常维护、修补与更换频次，降低全生命周期运维成本，确保屏蔽构造持续稳定工作，为方舱在复杂工况下长期、安全、稳定运行提供坚实支撑。见图1所示：



参考文献：

- [1] 明亮.医用 CT 诊断装置射线防护工程建设研究[J].科学技术创新,2025,(21):187-190.
- [2] 李傲雪,孙红玉,刘元军,等.X 射线防护材料在医用服装、建筑、工业领域的最新研究现状[J].印染助剂,2025,42(10):11-19.
- [3] 赵鹏.一种新型射线防护拼装一体化墙板[C]//中国医学装备协会.中国医学装备大会暨 2023 医学装备展览会会议论文汇编.山东大华医特环保工程有限公司;2023:183-185.
- [4] 郭利.新型射线防护装饰墙板[C]//中国医学装备协会 (China Association of Medical Equipment).中国医学装备大会暨 2021 医学装备展览会会议论文汇编.山东卡卡医用工程有限公司;2021:73-76.
- [5] 白明辉,刁海波,尤卫宏,等.一种移动式可调工业射线防护屏的研发及应用[J].石油和化工设备,2021,24(04):27-30.

图 1 接缝部位结构稳定性强化技术流程图

4.3 接缝屏蔽构造的实用性验证

为确保优化后接缝连续屏蔽构造的可靠性与适用性，需结合方舱真实使用环境开展系统性实用验证，验证内容以射线屏蔽效果和结构长期稳定性为核心，依据医疗、工业检测等典型工况制定完整测试方案。验证过程中，通过模拟不同能级射线照射条件，对接缝区域进行多点位连续监测，确保屏蔽层无穿透、无泄漏，各项指标满足防护规范要求。同时开展高低温循环、长时间振动冲击及加速老化试验，模拟长期服役状态下材料形变与结构受力情况，检验接缝是否出现松动、开裂、分离等问题^[5]。试验结果表明，经优化的屏蔽构造在复杂工况下仍可保持稳定性能，屏蔽效能与结构强度均达到设计标准，能够适应多种射线作业场景，具备良好的工程适用性与推广价值。

5 结语

方舱射线防护体系的可靠性，高度依赖铅玻璃观察窗与墙体接缝的连续屏蔽构造，该部位作为防护薄弱环节，其构造设计、材料选用与施工工艺直接影响射线泄漏防控效果。本文围绕接缝屏蔽的背景现状、现存问题、构造优化及应用成效展开分析，明确材料特性差异、设计缺失与施工不规范是屏蔽缺陷的主要诱因，通过针对性构造改进与工艺完善，可同步提升接缝屏蔽性能与结构稳定性。经实际检测验证，完善后的屏蔽构造能有效根除缝隙隐患，使方舱防护形成完整体系，满足各类射线作业场景安全要求。相关技术思路可为同类移动式防护设施观察窗接缝设计提供借鉴，推动方舱射线防护工程细节规范化，提升防护工程整体质量与安全保障水平。